



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL POZOLÂNICO DA CINZA DE
SABUGO DE MILHO**

Rafael Fiegenbaum

Lajeado, novembro de 2020

Rafael Fiegenbaum

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL POZOLÂNICO DA CINZA DE SABUGO DE MILHO

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Rafael Mascolo

Lajeado, novembro de 2020

Rafael Fiegenbaum

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL POZOLÂNICO DA CINZA DE
SABUGO DE MILHO**

Profa. Me. Rafael Mascolo – orientadora
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Dra. Betina Hansen
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Me. Débora Pedroso Righi
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado, 16 de novembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por ter me dado saúde e em meio à pandemia ter me dado força para concluir esta pesquisa. Quero agradecer também em especial meus pais, Cloves e Carmen, onde nunca mediram esforços para me dar todo suporte possível durante minha graduação, agradecer também às minhas irmãs Letícia e Natália que de alguma maneira sempre me ajudaram.

Quero agradecer meu orientador, Professor Rafael Mascolo por não poupar esforços para me ajudar durante a realização deste trabalho, agradecer aos demais professores, pelas dicas dadas durante este período em que realizei a pesquisa.

A equipe do Latec que sempre esteve disponível para sanar dúvidas e sempre tiveram uma atenção especial comigo.

Agradeço também meus colegas de graduação, colegas de trabalho e as empresas onde trabalhei durante este período de pesquisa, onde por vezes necessitei me ausentar para que eu pudesse concluir as tarefas deste trabalho. São elas: Móveis e Esquadrias Realce e Metalbovi.

Muito Obrigado!

RESUMO

Cada vez mais se incorpora materiais no cimento, seja de resíduos ou subprodutos industriais ou agrícolas, os quais têm a capacidade de melhorar as propriedades quando inserido em misturas de concretos e argamassas, além de reduzir a quantidade de cimento utilizada. A cinza de sabugo de milho (CSM) é um resíduo agroindustrial que, de acordo com estudos, sendo queimada e moída em condições adequadas, gera uma cinza com um elevado teor de sílica em sua composição, que pode ser adicionada ao cimento de modo parcial, como adição pozolânica. Essa pesquisa tem por objetivo principal estudar a cinza de sabugo de milho como material pozolânico e determinar o seu potencial, para então avaliar diferentes teores de substituição parcial do cimento na mistura de argamassa. No ensaio de materiais pozolânicos foram substituídos 25% do cimento por cinza para então determinar a melhor temperatura de queima da cinza e após, com a temperatura estabelecida, foram feitos traços também de 1:3 com relação água cimento 0,48 com substituição de 5%, 15% e 25% de cimento, sendo adicionada a cinza na mistura. Os ensaios realizados foram de massa específica para o cimento e para a cinza. Corpos de prova foram moldados para realização do ensaio de resistência à compressão e absorção de água. A partir dos ensaios realizados, os resultados obtidos para a melhor temperatura de queima foi de 750°C, onde se obteve um Índice de Pozolanidade de 122% e uma melhora de 22% na resistência à compressão. Já para os corpos de provas moldados com diferentes porcentagens, o traço com 5% de cinza apresentou a maior resistência à compressão média e o menor índice de absorção de água. Verifica-se, assim, a viabilidade do uso da cinza de sabugo de milho como adição pozolânica, sendo o teor ótimo de 5% de substituição.

Palavras-chave: Cinza de sabugo de milho Pozolana. Adição. Cimento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fabricação do cimento.....	9
Figura 2 - Dados de emissão de CO ₂	11
Figura 3 - Emissão de CO ₂	12
Figura 4 - Produção de CO ₂ por tipo de cimento.....	13
Figura 5 - Pastas de cimento (a) sem adição e (b) com adição pozolânica.....	15
Figura 6 - Milharal seco.....	19
Figura 7 - Sabugos de milho.....	20
Figura 8 - Composição química cinza de sabugo de milho.....	22
Figura 9 - Gráfico comparativo de resistência com diferentes idade.....	24
Figuras 10 - Processo queima de sabugos de milho.....	27
Figura 11 - Resultado da queima de sabugos de milho.....	28
Figura 12- Forno mufla.....	28
Figura 13 - Moinho de bolas e cinza de sabugo de milho.....	31
Figura 14 - Realização do ensaio de massa específica da cinza de sabugo de milho.....	32
Figura 16 - Medição da Consistência da Argamassa.....	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráficos de evolução da resistência à compressão.....	16
Gráfico 2 - Teste de compressão com substituição de CSM.....	22
Gráfico 3 - Comparativo de resistência de concreto com diferente traços e % de CSM.....	24
Gráfico 4 - Análise dos resultados do ensaio de compressão.....	30
Gráfico 5 - Granulometria da cinza de sabugo de milho.....	33
Gráfico 6 - Comparativo da Granulometria entre a cinza de sabugo de milho e cimento CII-F-32.....	33
Gráfico 7 - Análise dos resultados do ensaio de compressão.....	36
Gráfico 8- Resultado médio da resistência à compressão com a cinza queimada a 750°C.....	37
Gráfico 9 - Resultados de Absorção de Água.....	38

LISTA DE QUADROS TABELAS

Quadro 1 - Requisitos químicos para a classificação da pozolana.....	17
Quadro 2 - Requisitos físicos para a classificação da pozolana.....	18
Quadro 3 - Fluxograma do Programa Experimental.....	27
Tabela 1 - Composição química da Cinza de sabugo de milho.....	21
Tabela 2 – Índice mínimo de pozolanicidade.....	32
Tabela 3 - Resultados para análise da pozolanicidade da cinza de sabugo de milho.....	35
Tabela 4 - Resistência à compressão com a cinza de 750°C.....	36
Tabela 5 - Dados de consistência de argamassa com e sem aditivo superplastificante.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da Cinza de sabugo de milho.....	21
Tabela 2 – Índice mínimo de pozolanicidade.....	32
Tabela 3 - Resultados para análise da pozolanicidade da cinza de sabugo de milho.....	35
Tabela 4 - Resistência à compressão com a cinza de 750°C.....	36
Tabela 5 - Dados de consistência de argamassa com e sem aditivo superplastificante.....	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Problema de pesquisa	6
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo geral	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3 Justificativa da pesquisa	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Cimento	8
2.2 Produção de CO ₂	10
2.3 Adições Minerais	13
2.3.1 Pozolana	14
2.3.1.1 Classificação de pozolanas	17
2.4 Milho	18
2.4.1 Sabugo de Milho	19
2.4.2 Sabugo de Milho utilizado como biomassa	20
2.4.3 Cinza de Sabugo de Milho	21
2.4.4 Concreto com Cinza de Sabugo de Milho	22
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
3.1 Programa Experimental	26
3.2 Materiais	29
3.2.1.1 Cimento	29
3.2.1.2 Areia	30
3.2.1.3 Água de amassamento	30
3.2.1.4 Aditivo	30
3.2.1.5 Cinza de Sabugo de milho	31
3.2.2 Argamassa com diferentes teores de cinza de sabugo de milho	33

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Ensaio de pozolanicidade da cinza de sabugo de milho	35
4.2 Resistência à compressão com a melhor temperatura de queima da cinza	36
4.3 Índice de Absorção de Água	38
4.3 Índice de Consistência	38
5 CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Um dos alimentos mais produzidos, tanto para o meio agropecuário quanto humano, é o milho em grão. Com larga produção no planeta, é um dos alimentos mais consumidos no mundo e no Brasil. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), as expectativas para a safra 19/20 é de um crescimento de 3,4% de áreas plantadas com o cereal, com isso seriam 4,25 milhões de hectares plantados, sendo que no mês de Fevereiro deste ano a produção alcançou mais de 100 milhões de toneladas do grão. Conforme a Emater/Ascar (2020), a safra de verão 19/20 no RS terá uma diminuição da produção, a qual deverá ser a menor desde 2016, totalizando 28,72 milhões de toneladas de grãos, que mesmo com a queda de produção, ainda é um valor considerável. Após o processo de colheita, os grãos destinam-se ao beneficiamento, enquanto a palha e o sabugo de milho são descartados no momento da colheita, ficando assim na lavoura.

Segundo Preto e Mortoza (2010), o milho pode ser cultivado em qualquer solo, clima e altitude. Tratando do seu resíduo durante o processo da colheita, são rejeitos o sabugo, o colmo, as folhas e a palha, que se tornam biomassa com grande produtividade. Koopmans e Koppejan (1997) apud Preto e Mortoza (2010) afirmam que para cada tonelada de milho colhida, de duas a três toneladas são resíduos.

Empresas cimenteiras estão empenhadas na troca de combustíveis fósseis por biomassas com a finalidade de reduzir a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera (VOTORANTIM CIMENTOS, 2020). Conforme o SNIC (2019), 5% das emissões de CO₂ a nível global são da indústria cimenteira, mas este aspecto está mudando com o passar dos

anos devido às adições minerais e outras fontes de combustível para a produção de cimento. No ano de 1990, apenas 10% eram adições minerais no cimento. Vinte anos mais tarde, o cimento já tinha um terço de adições, como consequência reduzindo as emissões de CO₂. O motivo de termos adições no cimento é devido à redução de clínquer na mistura. O clínquer é o maior responsável do lançamento do dióxido de carbono, e sendo ele substituído por adições, teremos um cimento melhor para o meio ambiente, em que o resíduo da queima de biomassas pode se tornar materiais a serem adicionados, como por exemplo, a cinza de casca de arroz.

Diante deste contexto, essa pesquisa tem a intenção de realizar a caracterização mecânica e o potencial pozolânico da cinza de sabugo de milho (CSM), a fim de verificar se agrega uma melhoria nas propriedades do cimento.

1.1 Problema de pesquisa

Qual a temperatura de queima para obter o maior índice de pozolanicidade da cinza de sabugo de milho e qual o melhor percentual a ser adicionado ao cimento?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o potencial de aplicação da cinza de sabugo de milho como pozolana para o cimento Portland.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) avaliar o potencial pozolânico da cinza de sabugo de milho através da resistência mecânica;
- b) determinar a temperatura de queima ideal para o melhor potencial pozolânico da cinza de sabugo de milho.
- c) analisar a influência de diferentes teores de substituição parcial de cimento Portland por cinza de sabugo de milho em argamassas;

1.3 Justificativa da pesquisa

De acordo com Lima et al. (2008), atualmente existe uma grande procura por matérias-primas que possam ser incorporadas às misturas de concreto e argamassa em substituição parcial do cimento Portland, produto que é responsável por altas emissões de CO₂ no planeta. O autor cita que resíduos de atividades agroindustriais têm sido empregados, pois tem destinação final apropriada, resultando na diminuição da poluição no meio ambiente.

O cimento é o segundo material mais utilizado em nível mundial, ficando atrás apenas da água. O cimento é um material obtido através de jazidas de calcário, minério de ferro e argila, sendo, portanto, esgotável. Em sua produção, gera-se um impacto ambiental muito grande, porque há emissão de altas quantidades de CO₂ na atmosfera.

Com o intuito de diminuir a utilização de cimento, que acarretaria em uma série de benefícios ambientais e econômicos, será feito um experimento com substituição parcial de cimento por cinza de sabugo de milho, avaliando os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visto a disponibilidade de resíduos como o sabugo de milho nas plantações de milho, com a finalidade de se obter apenas o grão do milho, o país é um dos maiores produtores mundiais, que conforme dados do Conab (2020), produziu na safra 19/20 mais de 100 mil toneladas do cereal. Após colhido, o sabugo é considerado resíduo, sendo, portanto, devolvido à terra no momento da colheita e apodrecendo com o passar do tempo, sem ser reutilizado para outras finalidades.

2.1 Cimento

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a produção de cimento Portland tem como componentes primários os silicatos de cálcio, elementos como cálcio e sílica fazem parte da matéria-prima para a obtenção dos silicatos de cálcio, que devem ter proporções e formas adequadas. Minerais como calcário, calcário argiloso e conchas do mar são as fontes industriais de cálcio, mas argila ou dolomita na maioria das vezes estão com impurezas na sua composição. Folhelhos e argilas são preferíveis fontes de sílica adicional na mistura da matéria-prima do que a sílica quartzítica que é de difícil moagem. Alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e álcalis estão presentes nos minerais argilosos, portanto, os íons de magnésio, ferro e alumínio, além das álcalis na matéria-prima tem por sua vez uma ação mineralizante na formação de silicatos de cálcio facilitando assim a sua própria produção a temperaturas mais baixas. Quando não suficientes nas matérias-primas as quantidades de minerais de ferro e alumina, são incorporados materiais secundários como bauxita e minério de ferro. O resultado se dá por compostos de silicato de cálcio. O clínquer de cimento Portland possui também aluminatos e ferro aluminatos de cálcio. É preciso homogeneizar a farinha antes do

tratamento térmico, para se ter facilidade na formação dos compostos pretendidos para o clínquer de cimento Portland, por isso, processos e operações de britagem, moagem e mistura, respectivamente, são necessários. Com as análises químicas dos materiais, suas proporções são estabelecidas pela composição pretendida dos compostos do clínquer. As matérias-primas são fracionadas e moídas na maioria das vezes por moinho de bolas ou rolo para obter partículas menores de $75\mu\text{m}$. Para se obter o clínquer, os compósitos triturados (farinha) são pré-aquecidos e parcialmente calcinados. Então a mistura é inserida pela extremidade superior do forno de rotação contínua, feito de aço e revestido com tijolos refratários. O forno possui uma inclinação, transportando o material para a extremidade inferior, devido à declividade que possui, e pela velocidade de rotação do forno, que também é controlada, sendo a temperatura de calcinação da ordem de 1450°C a 1550°C . Posteriormente o clínquer vai para o resfriador, para receber o choque térmico, assim ocorrendo a cristalização do mineral e por último é feita a moagem do clínquer com gesso (redução do tempo de pega) e adições como pozolana, escória e filler, resultando no cimento desejado.

De acordo com Cimentos Mauá (2017), podemos ver na Figura 1 o processo de fabricação do cimento.

Figura 1 - Fabricação do cimento



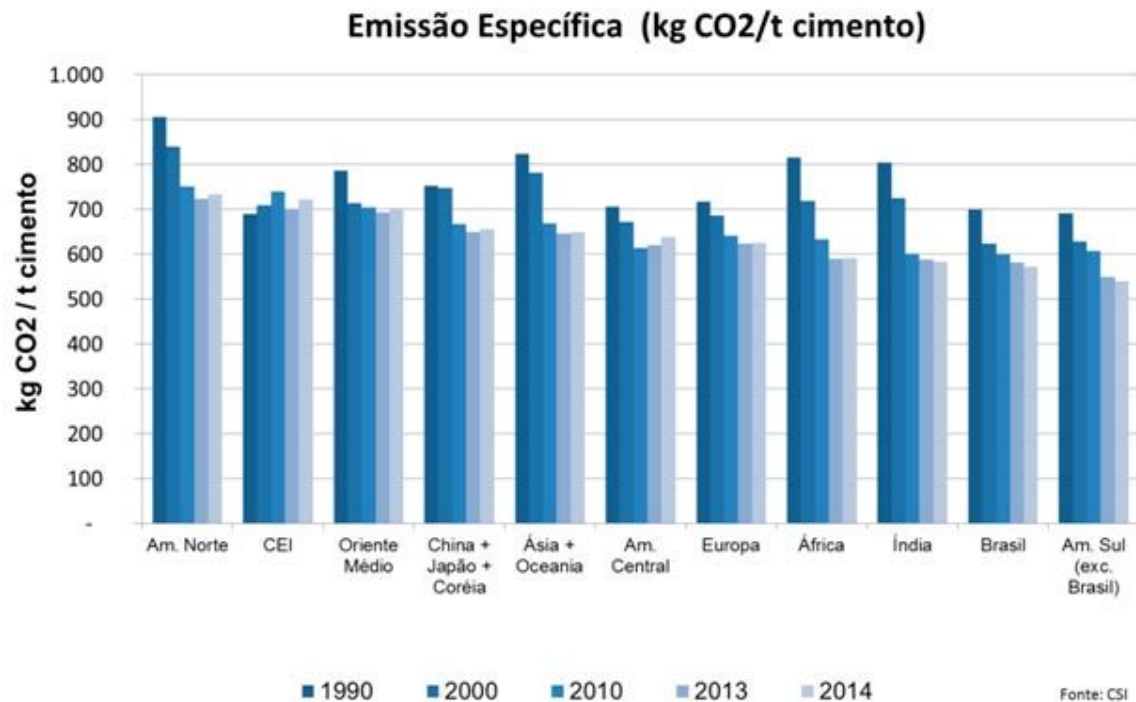
Fonte: Cimentos Mauá, (2017).

Para Mehta e Monteiro (2014), os cimentos Portland compostos têm superado a fabricação de cimentos puros, tendo em vista que os compostos têm um melhor desempenho e durabilidade para o concreto. Os cimentos Portland compostos têm adição de calcário, escória ou pozolana em sua mistura. O crescimento do uso desses tipos de cimentos se dá pelo fato citado anteriormente, em relação à durabilidade e desempenho, mas esses compostos trazem outros benefícios, como menor custo, menor uso de energia e, conseqüentemente, danos menores ao meio ambiente, por isso se tem um maior interesse em materiais pozolânicos e materiais cimentantes que possam se tornar adições.

Segundo Petrucci (1998), o cimento Portland é o aglomerante mais utilizado na fabricação de concreto, originário da moagem do clínquer. É composto praticamente de silicatos e aluminatos de cálcio, em que após ser moído se torna um pó fino, sendo misturado com gesso para perder a sua reatividade imediata, quando misturado com água, ocorre o processo de hidratação e se forma uma pasta que com o tempo endurece.

2.2 Produção de CO₂

Conforme a CSI (2014), a indústria do cimento é uma das maiores emissoras de dióxido de carbono (CO₂). O Brasil está entre os maiores fabricantes de cimento mundial, conseqüentemente, está entre os maiores produtores de CO₂ do mundo. Para diminuir as emissões de dióxido de carbono, os países estão procurando e utilizando fontes de combustíveis diferentes para a produção de cimento, como por exemplo, as biomassas. Porém ainda temos um número elevado de emissão por tonelada de cimento produzido, chegando a cerca de uma tonelada lançada a atmosfera para cada tonelada de cimento. Podemos ver os dados na Figura 2.

Figura 2 - Dados de emissão de CO₂

Fonte: CSI (2014).

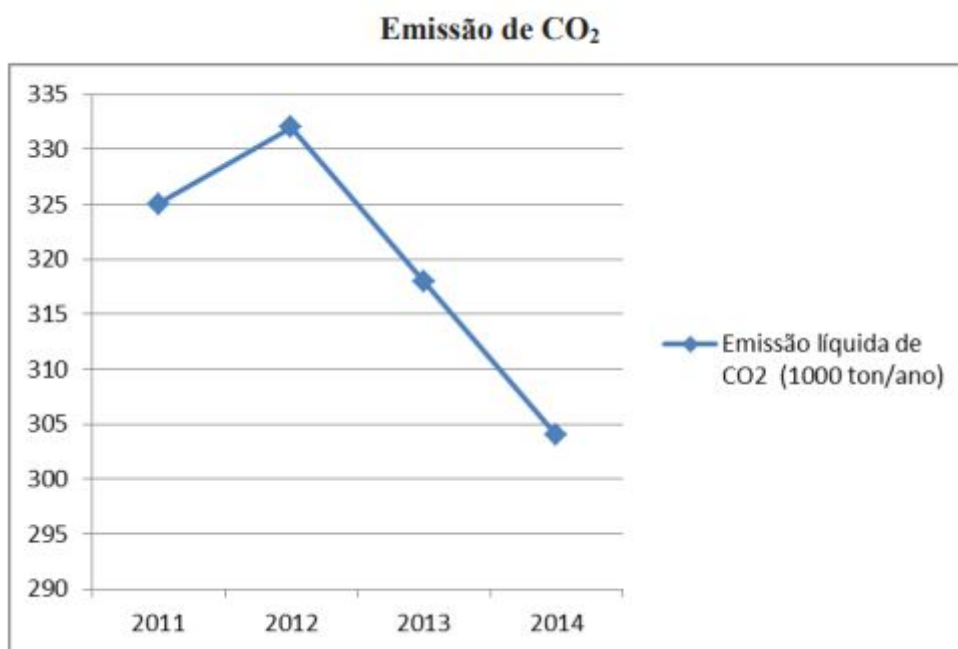
Mehta e Monteiro (2014) indicam que, desde o ano 1990 até 2011, teve um aumento exponencial na taxa mundial de produção de cimento. Os autores associam o aumento da temperatura da superfície da Terra em 0,7°C e de eventos naturais extremos, que se tornaram mais constantes, responsabilizando a emissão de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa. Sendo em parte devido a estes fatores, os autores julgam que deve ser controlada a emissão de gases na atmosfera pelas atividades.

De acordo com o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS, 2019), a redução de CO₂ se tornou sinônimo de competitividade na indústria do cimento a nível global. Em escala mundial, a indústria cimenteira responde por 7% de todo o CO₂ emitido, sendo que no Brasil as emissões giram em torno de 2,6% da indústria do cimento mundial. Com apoio da Roadmap Tecnológico do Cimento, está previsto uma diminuição de 35% dos lançamentos de CO₂ pela indústria cimenteira. Em 2020, o Brasil pretende diminuir em 25% o lançamento de CO₂ em relação ao ano de 1990. No ano de 2018, o Brasil mitigou em 18,6% a emissão do gás na atmosfera, além de utilizar pneus e resíduos industriais, foram utilizadas biomassas como combustíveis para fabricar o cimento.

A unidade cimenteira de Nobres, cidade localizada no estado do Mato Grosso, está aproveitando o diferencial que existe na região, devido à grande produção do setor primário. A empresa tem aproveitado para substituir os combustíveis fósseis por biomassa, de modo que atualmente cerca de 24% do combustível utilizado foi substituído, assim levando à diminuição das emissões de CO₂. A empresa sinaliza que tem sido importante e inovador adotar biomassas como combustível para produção, tendo em vista que estão conseguindo diminuir os GEE (Gases de Efeito Estufa), os custos da produção de cimento e a utilização de combustíveis fósseis (VOTORANTIM CIMENTOS, 2020).

Segundo Matos (2015), houve uma diminuição de emissão de CO₂, com dados tabelados da produção de cimento do ano de 2011 ao ano de 2014, podemos ver na figura 3 que a emissão líquida de CO₂ diminuiu, usando como dados a (1000 ton/ano). O nome da empresa não foi revelado.

Figura 3 - Emissão de CO₂

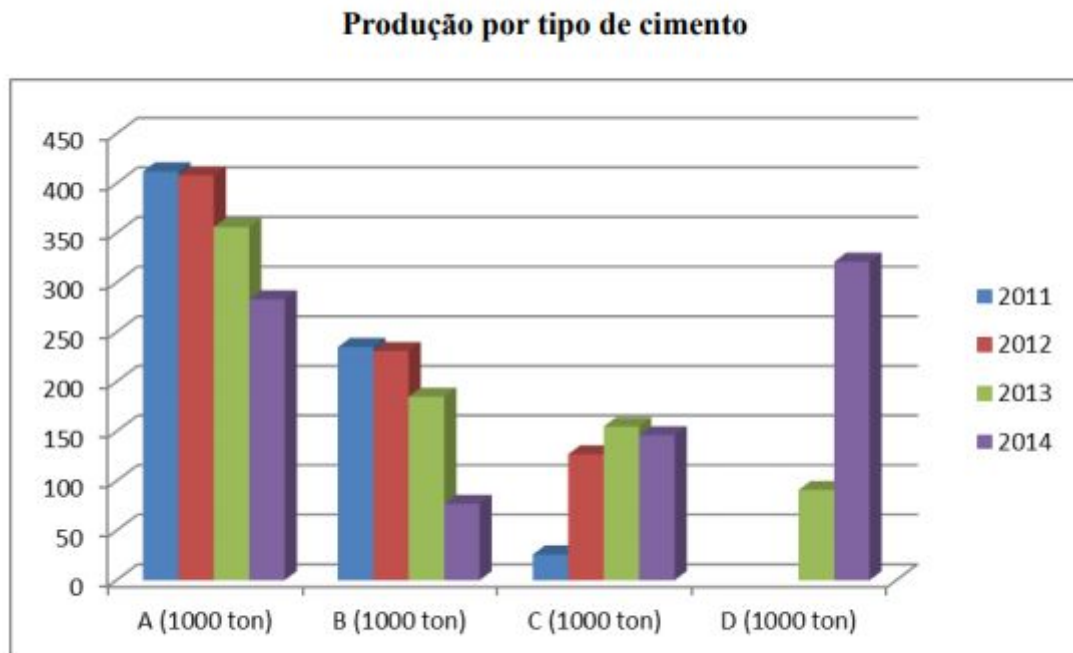


Fonte: Matos (2015).

Em relação ao tipo de cimento, Matos (2015) mostra dados sobre a fabricação de diferentes tipos de cimentos e a quantidade de CO₂ que é emitida no ambiente (figura 4), sendo A e B cimentos com menos aditivos e os cimentos C e D mais aditivados. Tiveram um aumento de CO₂ produzido com o passar dos anos os cimentos menos aditivados (A e B), enquanto houve uma queda na sua própria produção. C e D tiveram aumento de sua produção,

gerando uma diminuição da produção total de CO₂ da empresa, como podemos ver na Figura 4.

Figura 4 - Produção de CO₂ por tipo de cimento.



Fonte: Matos, (2015).

Neville (2015) destaca que o uso desses materiais suplementares é estimulado por preocupações ambientais e por meio do benefício tecnológico proporcionado pelos efeitos físicos e químicos. Isso contribuiu para a busca de outros resíduos que também podem ser incorporados ao cimento, conduzindo aos benefícios supracitados.

2.3 Adições Minerais

Duart (2008) define as adições minerais como materiais orgânicos, com finura igual ou menor que o cimento, as quais são acrescentadas às argamassas e aos concretos, na função de melhoria das propriedades e para conceder características especiais nas misturas, aumentando a resistência ou durabilidade. Duart (2008) explica também que existem três tipos de adições minerais: as Inertes, que quando adicionadas não apresentam nenhuma reação química significativa na mistura, como por exemplo, o filler de calcário; as adições hidráulicas são as que reagem com a presença de água, como a escória de alto forno; as

pozolânicas, adições que reagem com o hidróxido de cálcio, como a cinza da casca de arroz e a sílica ativa.

2.3.1 Pozolana

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), materiais pozolânicos são materiais silicosos e sílico aluminosos que não possuem propriedade ligante, mas com água e com hidróxido de cálcio em temperatura ambiente, formam compostos com propriedades cimentícias. Estes materiais podem ser encontrados de forma natural, com origem vulcânica e sedimentar com atividade pozolânica. Ainda, podem ser encontrados de forma artificial, com tratamentos térmicos ou subprodutos industriais, os mais comuns são argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais com atividade pozolânica, dentre eles está a cinza de casca de arroz.

Materiais como a pozolana podem ser encontrados de forma natural devido ao rápido resfriamento do magma dos vulcões, criando um material de estrutura desordenada, a matéria solidificada obtém uma textura porosa e uma alta área superficial específica, que eleva sua reatividade química. Geralmente as pozolanas naturais são encontradas com impurezas, devido aos minerais argilosos as contaminarem. Existe uma dificuldade na classificação para as pozolanas naturais, pois raramente tem apenas um único reagente na sua composição. As pozolanas podem ser encontradas em vidros vulcânicos, tufos vulcânicos, argilas ou folhelhos calcinados e terras diatomáceas, sendo que todos têm eventos vulcânicos como participação para que se tornassem pozolanas. As pozolanas podem ser encontradas em materiais de subprodutos industriais, como cinza de carvão e em alguns resíduos da cultura agrícola, como casca de arroz, sílica ativa de alguns processos metalúrgicos e escória granulada de metais industriais ferrosos, não-ferrosos e cinza volante de carvão que é o principal resíduo industrial do planeta (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Castro (2008), a pozolana tem por característica produzir compostos estáveis com propriedade aglomerante, isso graças a sua capacidade de reagir e combinar com o hidróxido de cálcio (CH). No cimento Portland, o hidróxido de cálcio é liberado durante a hidratação dos silicatos que reagem com a pozolana, incorporada relativamente no cimento, gerando assim uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), dando mais estabilidade que o cimento hidratado.

Comparando o cimento Portland e cimento Portland pozolânico, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), é possível compreender a diferença de comportamento entre os dois cimentos demonstrando a reação pozolânica ou química, as quais podemos ver nas Equações 1 e 2, durante a formação de cálcio hidratado (C-S-H), em que:

a) Cimento Portland:

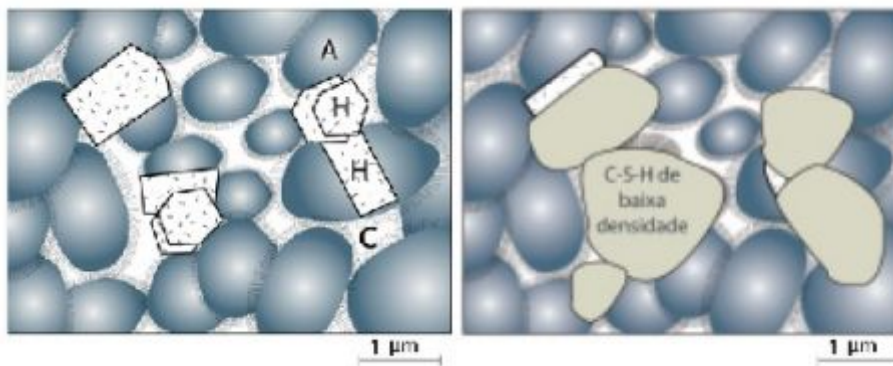


b) Cimento Portland Pozolânico:



De acordo com a Figura 5, faz-se o comparativo de duas pastas de cimento hidratadas, em que (a) não possui adição de pozolana e (b) cimento com adição de pozolana.

Figura 5 - Pastas de cimento (a) sem adição e (b) com adição pozolânica.

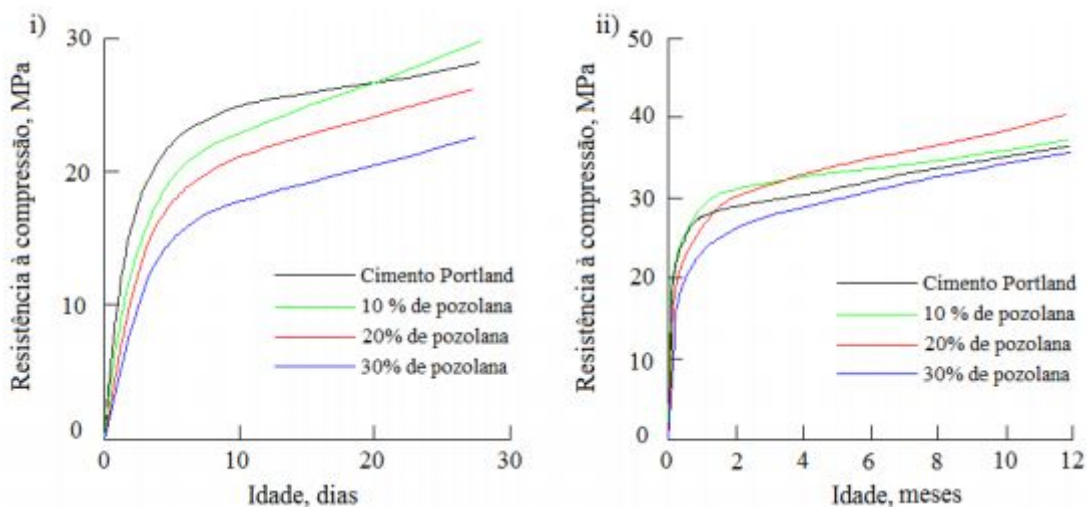


Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Podemos ver que na Figura 5 (b) os vazios são menores. Esses que antes eram ocupados pela água e hidróxidos de cálcio foram substituídos por C-S-H de baixa densidade. Na reação com cimento pozolânico a taxa de liberação de calor e ganho de resistência é distribuído em um período mais longo, a reação ao invés de produzir o hidróxido de cálcio, consome-o e resulta no preenchimento dos espaços capilares de forma efetiva, melhorando a resistência e a impermeabilidade do sistema, garantindo durabilidade da pasta hidratada diante de ambientes ácidos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os mesmos autores citam que as reações pozolânicas ligadas à resistência em cimentos contendo de 10%, 20% e 30% de pozolana apresentam que após 7 dias de hidratação, elas auxiliam no aumento da resistência. A cura úmida em etapas mais longas de cimento com adição do material é superior aos cimentos sem adição, devido ao aumento de C-S-H. No Gráfico 1 podemos ver o ganho de resistência com percentuais diferentes de pozolana incorporados ao cimento Portland com diferentes idades.

Gráfico 1 - Gráficos de evolução da resistência à compressão.



Fonte: Mehta e Monteiro, (2014).

Segundo Santos (1989), a pozolana é um material natural ou artificial, e quando incorporado em concretos e argamassas provoca mudanças nas características das propriedades, sendo superiores se comparado aos produtos que não possuem pozolana na sua mistura. Um testemunho da durabilidade e resistência da pozolana como material cimentante são as ruínas do Império Romano, que resistem até os dias atuais (BAUER, 2008).

Segundo Silva et al. (2007), a cinza de casca de arroz (CCA) provém do beneficiamento do arroz, no qual se utiliza a própria casca deste produto, para a secagem dos grãos, em que se tem a cinza como resíduo. Em uma substituição de cimento por CCA dentro de 10% a 20%, se tem um ganho na resistência mecânica e diminui os ataques de agentes agressivos como CO_2 , sulfatos e cloretos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Tashima (2006), materiais pozolânicos vêm sendo incorporados no clínquer com a sua substituição parcial em diversas indústrias cimenteiras, sendo os materiais

adicionados providos de setores industriais, assim gerando os cimentos pozolânicos. Por meio de pesquisas, foi confirmado que as pozolanas podem ser empregadas também durante a produção de argamassas e concretos, devido à sua atuação na mudança de propriedades de durabilidade, permeabilidade e resistência.

2.3.1.1 Classificação de pozolanas

A NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica em 3 classes os materiais pozolânicos, conforme a sua origem e obedecendo os requisitos da norma. A classe N são de pozolanas de origem natural ou artificial, como materiais vulcânicos com caráter petro ácido, argilas calcinadas, charts silicosos e terras diatomáceas; Classe C provém de pozolanas produzidas através da combustão de carvão mineral; Classe E são pozolanas que não se englobam nas classes citadas anteriormente.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) faz exigências físicas, químicas e índice de atividade, como descritos nos quadros (1 e 2).

Quadro 1 - Requisitos químicos para a classificação da pozolana.

Valores em porcentagem (%)

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio(*)
	N	C	E	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	ABNT NBR NM 25

(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014, p.04)

Quadro 2 - Requisitos físicos para a classificação da pozolana.

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751

(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas..

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014, p.04).

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que as cinzas que dispõem um alto teor de cálcio em sua estrutura possuem maior reação pozolânica, enquanto as cinzas com baixo teor de cálcio tem uma reação pozolânica inferior. Os autores definem como pozolanas naturais todas pozolanas de origem rochosa ou vulcânica, com exceção da terra diatomácea. Para a utilização do material como adição envolve geralmente os processos de britagem, moagem, seleção por tamanho e, caso tenha a necessidade, ativação térmica. Mehta (1987), definiu as pozolanas tendo em visto sua origem, sendo de origem natural ou artificial.

Conforme a norma Americana (ASTM) C618 (2012), as pozolanas são classificadas em três tipos, em que são definidas pelas Classes N, F e E. A classe N engloba as pozolanas consideradas cruas ou calcinadas, oriundas de terra diatomáceas, quartzo de opalina e xistos, turfões vulcânicos e argilas. A classe F compõe-se de cinza volante produzida através da incineração de carvão betuminoso ou antracito, que contém atividade pozolânica. Classe E são cinzas oriundas de carvão betuminoso ou lignina, que apresenta propriedades cimentantes e pozolânicas.

2.4 Milho

De acordo com Magalhães et al. (2013), a planta do milho é originária da América Central, onde sua cultura é típica de clima tropical e se adapta facilmente a diversos tipos de solos e para ser cultivada precisa de calor e umidade.

Romão (2015) afirma que, no Brasil, a cultura do milho está bastante disseminada devido ao cultivo do cereal, em que os agricultores conseguem aproveitar o seu uso de várias formas em propriedades rurais. Peixoto (2014) aponta o Brasil como um país estratégico em função do desenvolvimento da economia a partir dessa cultura, é o terceiro maior produtor e segundo maior exportador mundial de milho.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), estimou-se que para o ano de 2018 a produção de milho foi de 82,9 milhões de toneladas, sendo a área cultivada de aproximadamente 16 milhões de hectares.

A Figura 6 nos mostra um milharal seco, onde o milho será colhido para se obter o grão para diferentes fins.

Figura 6 - Milharal seco



Fonte: Revista Globo Rural, (2020).

2.4.1 Sabugo de Milho

Devido à grande produção de milho (grão), que gera um grande volume residual, Torre et al. (2008) indica que 180 kg de sabugo são obtidos a cada tonelada de milho processada. Já para Bose e Martins Filho (1984), 22% do peso do grão condiz com o sabugo. Segundo Dias et al. (2012), estima-se que a cada tonelada de grãos é gerado entre 0,3 a 0,9 tonelada de sabugos.

Conforme Aprianti et al. (2015), resíduos agrícolas têm sido estudados com o intuito de aplicação como pozolana. Dentre eles, destacam-se as cinzas da folha e do sabugo de milho, que possuem grande representatividade em muitos países que o utilizam como

biomassa. Porém os estudos relacionados ao envolvimento destes materiais são escassos e de pouca referência bibliográfica no Brasil.

Na figura 7 podemos ver sabugos de milho recolhidos após a colheita do produto. Observa-se que alguns sabugos ainda estão com os grãos.

Figura 7 - Sabugos de milho



Fonte: Autor, (2020).

2.4.2 Sabugo de Milho utilizado como biomassa

Em comparação com a madeira, o sabugo tem uma capacidade de queima melhor, fato este comprovado por meio de um estudo realizado na cidade de Xarupi no estado do Acre, onde foi feito um estudo em que sabugos de milho e madeira foram utilizados como fonte de calor como resíduos de biomassa. Os resultados comprovam que o poder calorífico (Kcal/kg) dos sabugos de milho é de 4019 Kcal/kg, enquanto a madeira é de 2000 Kcal/kg. (BOYADJIAN, 2015).

A queima do sabugo de milho pode ser utilizada como fonte de energia para secagem de grãos. A empresa Agroeste Sementes de Xanxerê/RS utiliza os sabugos para a secagem de grãos, na qual se tem uma caldeira projetada para este fim. Processo semelhante como o que é feito com o arroz (PÁGINA RURAL, 2006).

Segundo Quirino (2003), os resíduos de biomassa podem ser utilizados como fonte energética na geração de calor, vapor, ou sob forma de combustível sólido, como por exemplo o carvão mineral.

2.4.3 Cinza de Sabugo de Milho

Adesanya e Raheem (2008) apresentaram resultados à caracterização química por FRX - Fluorescência de Raio X das cinzas de sabugo de milho, nos quais os elementos SiO_2 + Al_2O_3 resultam em média 73,86% das cinzas das espigas (tabela 1), assim determinando que é um material com potencial pozolânico. Os sabugos foram queimados durante 8 horas, em uma temperatura de 650 °C. Contudo, é importante que o material atenda outras características apresentadas pela NBR 12653 (ABNT, 2014), como, por exemplo, que a sílica encontrada na cinza esteja em estado amorfo.

Tabela 1 - Composição química da Cinza de sabugo de milho

Composição química da cinza de espiga de milho

	Composição (%)			Média
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
SiO_2	67,33	65,39	66,41	66,38
Al_2O_3	7,34	9,14	5,97	7,48
Fe_2O_3	3,74	5,61	3,97	4,44
CaO	10,29	12,89	11,53	11,57
MgO	1,82	2,33	2,02	2,06
TiO_2	1,11	1,10	1,01	1,07
N_2O	0,39	0,48	0,36	0,41
K_2O	4,20	4,92	5,64	4,92
SiO_2 total + Al_2O_3	74,67	74,53	72,38	73,86

Fonte: Adesanya e Raheem, (2008).

Tumba et al. (2018) chegaram em resultados diferentes por FRX - Fluorescência de Raio X da composição química da cinza de sabugo de milho. SiO_2 também foi o material principal encontrado, porém com uma diferença no percentual, como mostra a figura 8. Os autores fizeram a queima ao ar livre, sem controle de temperatura e tempo de queima, fatores que fazem diferença no material resultante (cinza).

Figura 8 - Composição química cinza de sabugo de milho

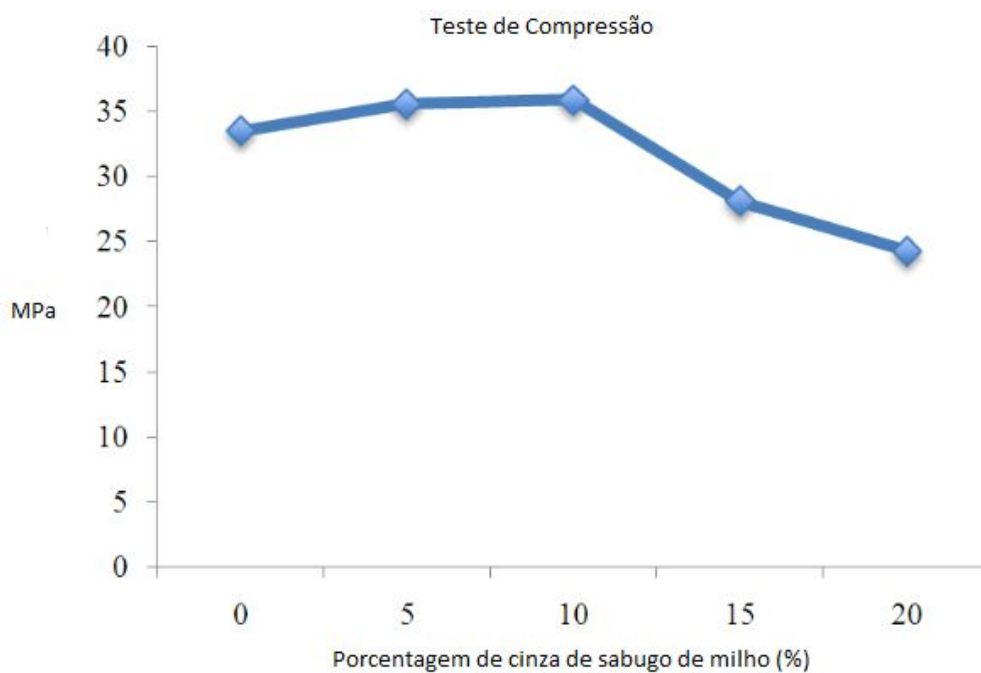
Óxido	Porcentagem (%)
Dióxido de Silício	59.54
Óxido de Alumínio	6.53
Óxido de Ferro	4.93
Óxido de Cálcio	5.96
Óxido de Magnésio	2.32
Óxido de Potássio	6.67
Óxido de Sódio	0.43
Trióxido de enxofre	1.04
Perda ao fogo	9.37

Fonte: Tumba et al., (2018).

2.4.4 Concreto com Cinza de Sabugo de Milho

Estudos feitos por Price et al. (2014) provam que devido à atividade pozolânica da cinza de sabugo de milho, podemos misturá-la ou substituir o cimento pela cinza. Os autores fizeram teste com a substituição de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em relação ao traço padrão sem substituição, como mostra o gráfico 2. O melhor resultado obtido foi com a substituição de 10% de cimento pela cinza de sabugo de milho.

Gráfico 2 - Teste de compressão com substituição de CSM.



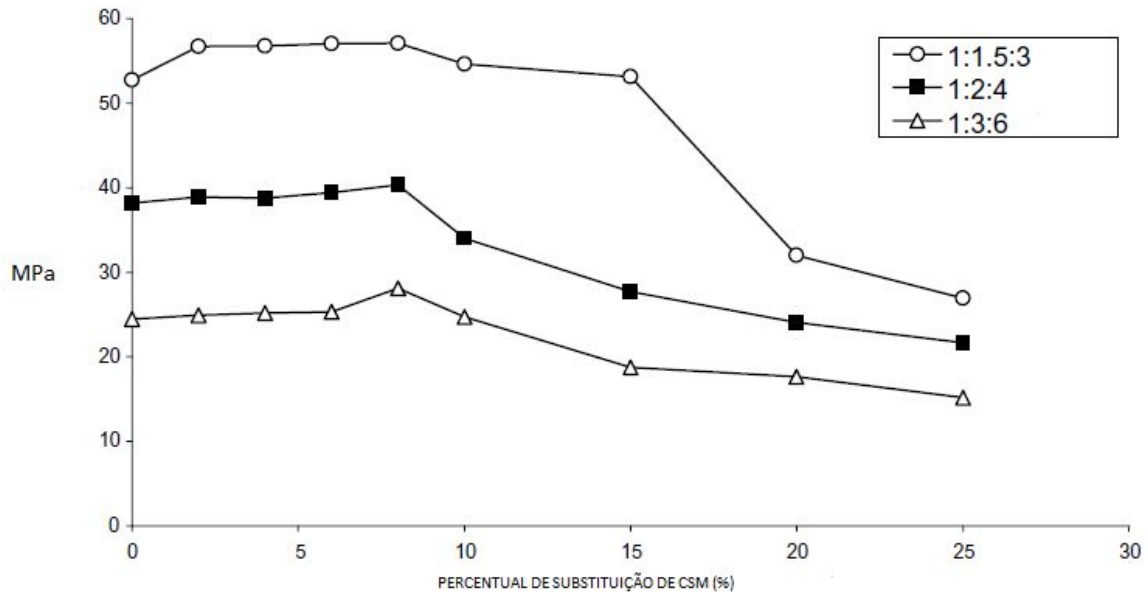
Fonte: Price et al., (2014).

Adesanya e Raheen (2009) utilizaram três traços de concreto diferentes para a adição de cinza de sabugo de milho, esses traços tiveram nove porcentagens diferentes de substituição, 0% traço de referência, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 15%, 20% e 25%. Foram armazenados em uma câmara de cura a uma temperatura de $27^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, com umidade em 90% por 24 horas e depois foram desmoldados e colocados em água, ficando submersos. Os corpos de provas foram rompidos em idades diferentes, sendo de 3, 7, 28, 60, 120 e 180 dias. Chegando nos resultados dos testes de compressão com a média de três amostras.

A composição química da cinza está descrita na tabela 1, os traços utilizados foram 1: 1½: 3, 1: 2: 4 e 1: 3: 6, respectivamente cimento, areia e brita, com relação a/c (água/cimento) de 0,5, 0,6 e 0,7, também respectivamente com os traços, relação que constataram ideais para os traços. Em termos de trabalhabilidade do concreto, com o aumento do percentual de cinza é preciso mais água para ter trabalhabilidade, típico do concreto com cimento pozolânico. Podemos ver no Gráfico 3 o comparativo entre a porcentagem de cinza de sabugo de milho utilizado com a resistência do concreto com 180 dias. (ADESANYA; RAHEEN, 2009).

Os traços tiveram que atender a NIS 439:2000, norma vigente para concreto na Nigéria, país dos autores anteriormente citados. Por meio de resultados obtidos, houve uma melhora na resistência do concreto com mais idade, a partir dos 60 dias com diferentes teores de substituição de cinza de sabugo de milho, mas com a idade de 180 dias, se mostrou que o percentual ideal dos três traços é de 8% (ADESANYA; RAHEEN, 2009).

Gráfico 3 - Comparativo de resistência de concreto com diferentes traços e % de CSM.



Fonte: Adesanya e Raheem, (2009).

Tumba et al. (2018) substituiu cimento por CSM (cinza de sabugo de milho) no concreto autoadensável, onde também foi adicionado o aditivo superplastificante, o qual não indica o traço utilizado, foi feita a substituição com 0% traço referência, 5%, 10%, 15%, 20% de cinza, conforme indica a figura 9 e apresenta os resultados dos testes de compressão.

Figura 9 - Gráfico comparativo de resistência com diferentes idades.



Fonte: Tumba et al., (2018).

Segundo o autor, as substituições com 10% mostraram resistência próximas ao traço referência, no entanto, em substituições com maiores percentuais de cinza foram obtidas resistências mais baixas. Para o mesmo, substituições com 5% de cinza estão com ótimos

resultados de resistência, ainda mais quando os corpos de prova atingiram 28 dias de idade. Observou-se, então, que com o passar dos dias a resistência do concreto aumentou. O autor também estabeleceu que a CSM é um material pozolânico atendendo a norma americana ASTM C618, sob a classe N que é de pozolanas naturais.

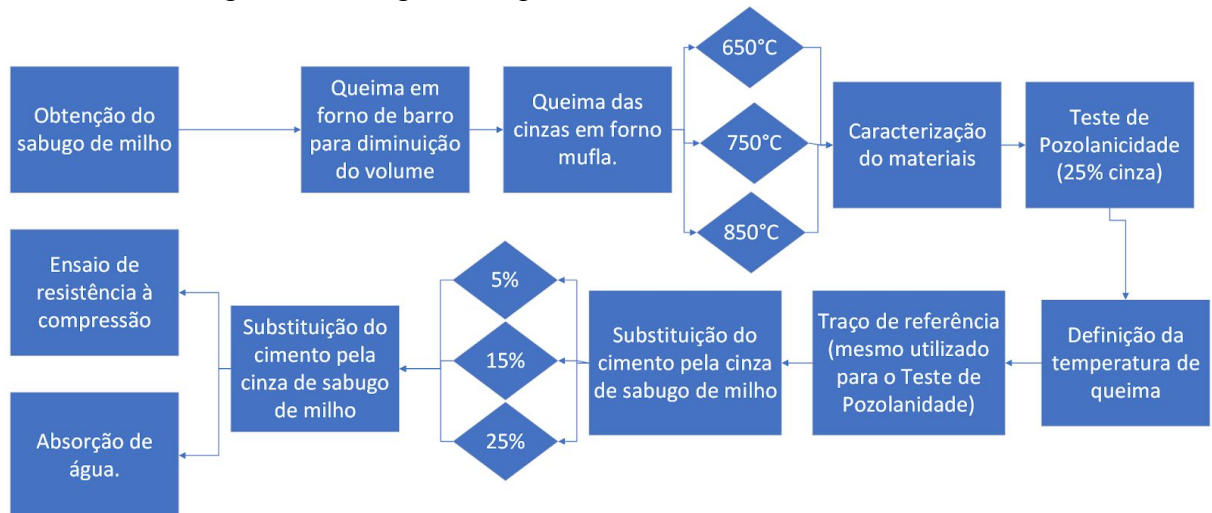
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atender o objetivo principal foi desenvolvido um programa experimental que abordará as particularidades dos materiais, dosagens e equipamentos, atendendo à normatização brasileira.

3.1 Programa Experimental

O programa experimental está dividido em 4 etapas, no qual a primeira etapa foi o recolhimento e a queima dos sabugos de milho em forno feito de tijolos. No processo de queima foi colocada uma calha feita de aluzinco para que as cinzas fossem depositadas sobre a calha e não se misturassem com outros tipos de cinzas, provenientes da queima de outros materiais neste forno. Após a queima inicial, essas cinzas foram levadas para a queima em forno mufla com temperatura controlada no período de uma hora, com temperaturas na ordem de 650, 750 e 850°C, conforme os autores Adenasya e Raheen (2009). No quadro 3, podemos ver os procedimentos feitos através de um fluxograma e na figura 10 é demonstrado o processo de queima inicial dos sabugos de milho no forno de tijolos.

Quadro 3 - Fluxograma do Programa Experimental.



Fonte: do autor, (2020).

Ao todo foram queimados cerca de 80 kg de sabugos de milho, após as duas queimas resultou-se em cerca de 4,2 kg de cinza. O primeiro processo de queima foi feito em um forno de tijolos, onde os sabugos eram adicionados parcialmente devido a redução do volume dos mesmos.

Figuras 10 - Processo queima de sabugos de milho.



Fonte: Autor, (2020).

Após o processo de queima, o resultado da calcinação dos sabugos pode ser observado na figura 11.

Figura 11 - Resultado da queima de sabugos de milho.



Fonte: Autor, (2020).

Em seguida o material foi encaminhado para a segunda queima em forno mufla, nas temperaturas definidas anteriormente.

Figura 12 - Forno mufla



Fonte: Autor, (2020)

Na segunda etapa, após a queima completa em forno mufla com diferentes as temperaturas já indicadas, foi feita cominuição da cinza no moinho de bolas e então realizado

o ensaio de pozolanicidade com as cinzas obtidas, conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014), sendo utilizado o cimento Portland tipo CP-II-F-32. Para cada temperatura de queima foi feito um traço, portanto foram feitos quatro traços de argamassa, o de referência e com cada temperatura de queima já definidas anteriormente. As cinzas substituíram 25% do cimento e então realizou-se o rompimento com teste de compressão mecânica dos 4 corpos de prova, para cada traço produzido, estes eram de formato cilíndrico nas dimensões de 5x10 cm conforme determina a NBR 7215 (ABNT, 2009), portanto para o ensaio de pozolanicidade foram produzidos 16 corpos de prova.

A terceira etapa consistiu no desenvolvimento de 36 corpos de prova, em que foi utilizado o mesmo traço do ensaio de pozolanicidade, porém com substituição parcial de 5%, 15%, 35% e 45% em relação ao volume do cimento Portland. A cinza colocada na mistura foi aquela com melhor resultado à compressão mecânica obtida no ensaio de pozolanicidade, conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014).

A quarta etapa foi a obtenção dos resultados a partir dos corpos de prova, onde 4 cps de cada percentual foram rompidos para que se tenha os resultados da resistência à compressão conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) e outros dois para ensaio de absorção de água, como indica a NBR 9778 (ABNT, 2009). Sendo necessários os procedimentos de pesagem, desmoldagem, armazenamento e cura dos corpos de prova. A idade dos corpos de prova para ambos foi aos 28 dias.

3.2 Materiais

Os materiais utilizados para a fabricação da argamassa são os materiais convencionais como: cimento, areia, água para amassamento, aditivo superplastificante da marca Grace e cinza de sabugo de milho. Estes materiais, exceto a cinza de sabugo de milho que foi obtida pelo autor deste trabalho, foram fornecidos no LATEC.

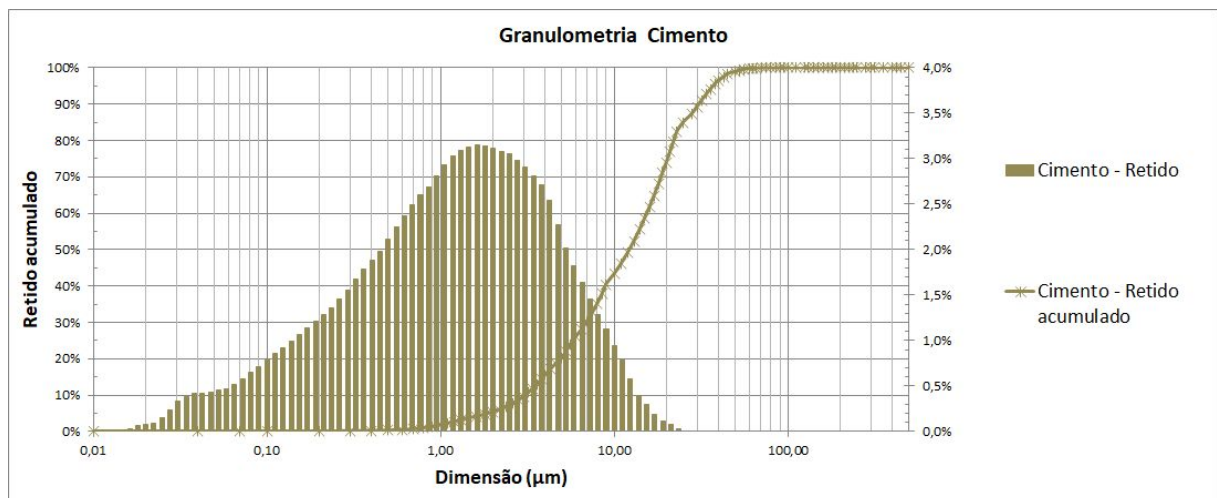
3.2.1.1 Cimento

O cimento que foi utilizado para o teste de pozolanicidade, conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014), foi o CP II-F-32, este tem adição de fíler de calcário, em teor de 6% a 10%.

Para determinar a massa específica do cimento, foi utilizado o frasco volumétrico denominado de Le Chatelier, conforme determina a NBR 16605 (ABNT, 2017). O ensaio foi realizado duas vezes como indica a norma, o qual não poderia resultar em uma diferença maior de 0,01 g/cm³. A massa específica do cimento resultou em 2,998g/cm³.

Para fins de comparação entre as granulometrias, foi realizada granulometria à laser em uma amostra de cimento, no gráfico 4 pode se ver a curva granulométrica do mesmo.

Gráfico 4 - Granulometria do cimento CP II F-32.



Fonte: Autor, (2020).

3.2.1.2 Areia

A areia utilizada foi conforme determina a NBR 5752 (ABNT, 2014), em que deve conter quatro frações divididas em quatro partes iguais de 468g, as frações indicadas pela norma são: #100, #50, #30 e #16.

3.2.1.3 Água de amassamento

A água para amassamento do concreto deve atender aos requisitos da NBR 15900-1 (ABNT, 2009) e foi fornecida pelo LATEC. Essa é disponibilizada pela rede de abastecimento local, CORSAN.

3.2.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado foi superplastificante, quando necessário para chegar na mesma consistência do traço referência, que teve uma abertura de 27 cm. A norma especifica que a abertura tem uma margem de 1 cm para mais e 1 cm para menos na sua consistência.

3.2.1.5 Cinza de Sabugo de milho

Foram utilizadas cinzas com diferentes temperaturas de queima, nas temperaturas de 650°C, 750°C e 850°C. Após a queima, as cinzas foram trituradas em moinho de bolas com 66 esferas e 1000 rotações, a uma velocidade de 80 voltas por minuto. Na Figura 13 podemos ver o moinho de bolas e o resultado da cominuição da cinza.

Figura 13 - Moinho de bolas e cinza de sabugo de milho.



Fonte: Autor, (2020).

A cinza apresenta coloração acinzentada escura, característica que ocorre quando o material possui pouca matéria orgânica na sua composição. No Gráfico 5 pode-se ver a curva granulométrica da cinza de sabugo de milho.

Seguindo os mesmos procedimentos realizados com o cimento para obter a massa específica da cinza, devido à sua finura, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017), o resultado obtido da massa específica da cinza foi de 2,19 g/cm³. Na Figura 14 pode-se ver o ensaio da massa específica sendo realizado em laboratório.

Figura 14 - Realização do ensaio de massa específica da cinza de sabugo de milho.



Fonte: do autor, (2020).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), o índice de atividade pozolânica deve ser igual ou superior a 90% para o material ser aceito como material pozolânico, como indica a tabela 2. O índice de pozolanicidade é calculado através da equação:

$$I_{\text{cimento}} = \frac{F_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100$$

Onde: FcB é o traço que possui 25% de cinza e FcA é o traço de argamassa referência.

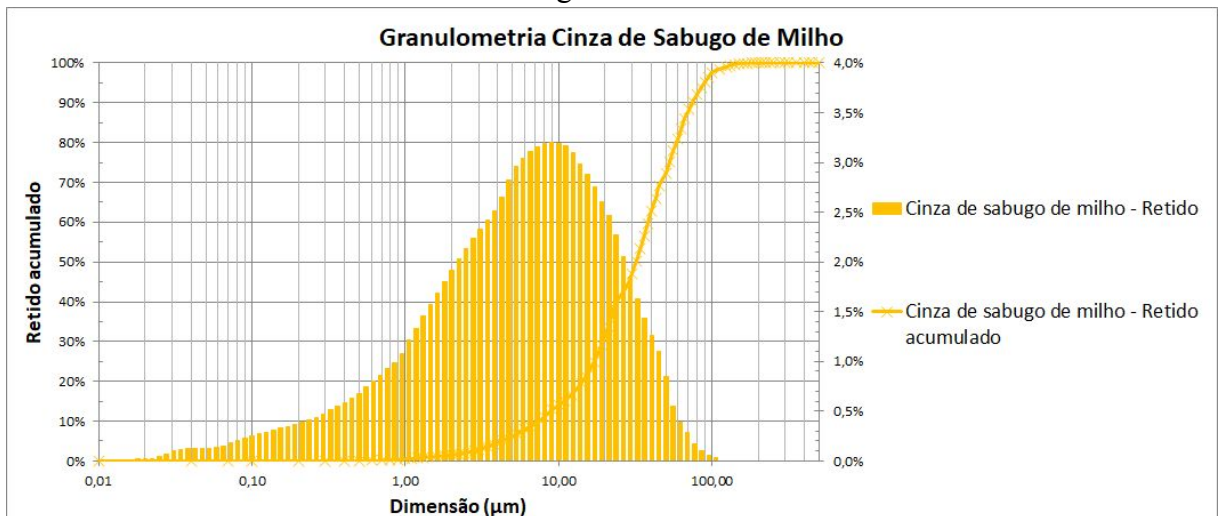
Tabela 2 – Índice mínimo de pozolanicidade.

Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias.	
NBR-12653 (% mínimo estabelecido)	≥90

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014), 2019.

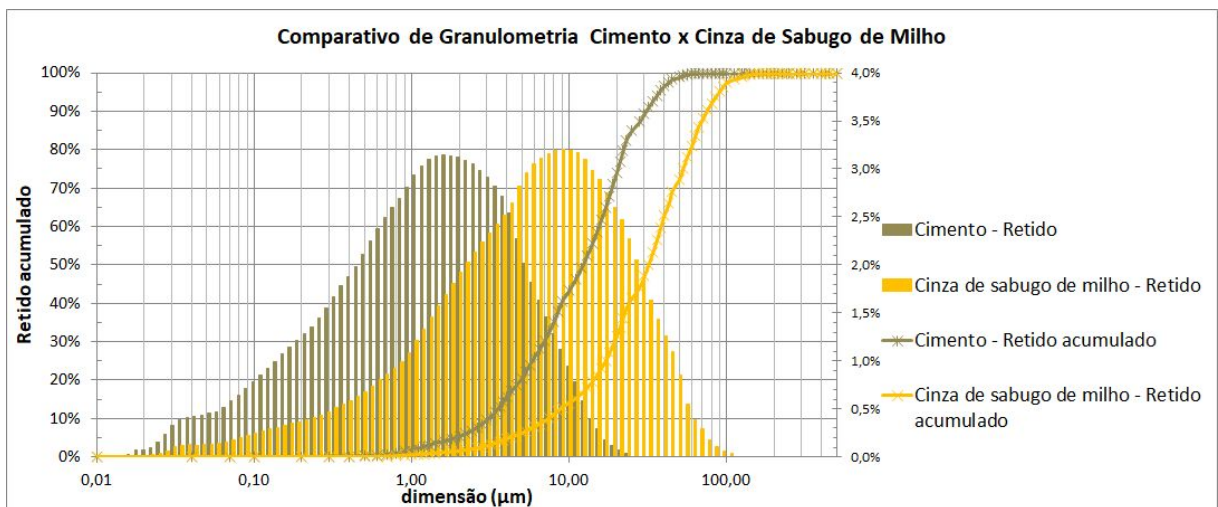
O gráfico 6 apresenta o comparativo entre os dois materiais (cinza de sabugo de milho e o cimento CP II-F32), em que pode-se ver que a cinza tem uma distribuição granulométrica maior que a do cimento.

Gráfico 5 - Granulometria da cinza de sabugo de milho.



Fonte: Autor, (2020).

Gráfico 6 - Comparativo da Granulometria entre a cinza de sabugo de milho e cimento CII-F-32.



Fonte: Autor, (2020).

3.2.2 Argamassa com diferentes teores de cinza de sabugo de milho

Os materiais utilizados para a produção da argamassa são os mesmos utilizados no ensaio de materiais pozolânicos, porém o que difere são as porcentagens utilizadas da cinza que foram na ordem de 5%, 15%, 35% e 45%, valores estes que estão descritos anteriormente na quarta etapa do programa experimental. A cinza utilizada nestas substituições foi aquela com o melhor resultado do índice de pozolanicidade no ensaio de materiais pozolânicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo traz os resultados obtidos nos ensaios do capítulo anterior, onde todos os resultados foram analisados, interpretados e comparados com referências bibliográficas e normas regulamentadoras.

4.1 Ensaio de pozolanicidade da cinza de sabugo de milho

No ensaio de compressão, para avaliar o potencial pozolânico da cinza de sabugo de milho, foram rompidos 16 corpos de prova, sendo quatro por traço.

É possível observar na Tabela 3 que as cinzas nas temperaturas de 750°C e 850°C têm índice maior que 90%, resultado estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), índice este calculado com as médias dos corpos de prova rompidos. Nessas temperaturas elas estariam aptas para serem adicionadas em concreto ou argamassa, então podemos considerar a cinza de sabugo de milho como material pozolânico.

Tabela 3 - Resultados para análise da pozolanicidade da cinza de sabugo de milho.

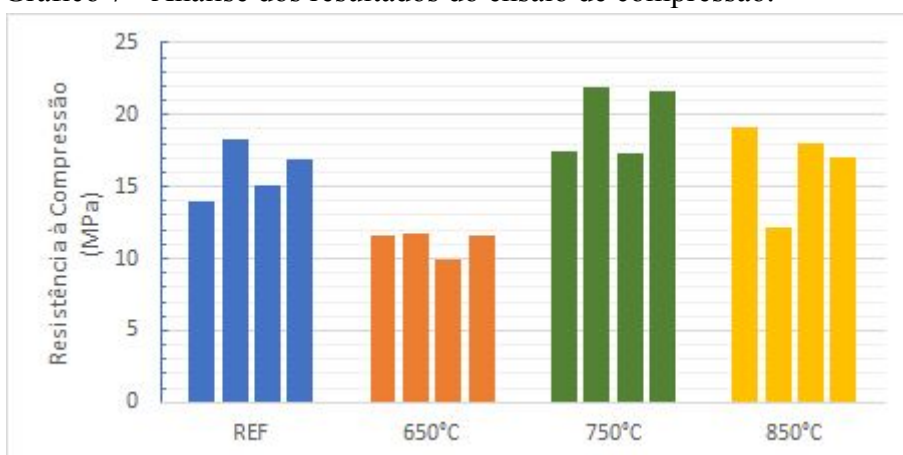
Traço	Resistência MPa				Média	Desvio Padrão	Índice de Pozolanicidade(%)
REF	14,03	18,28	15,15	16,87	16,08	1,87	-
650°C	11,63	11,80	9,87	11,54	11,21	0,90	70%
750°C	17,47	21,89	17,25	21,59	19,55	2,53	122%
850°C	19,18	12,10	18,02	17,08	16,60	3,12	103%

Fonte: Autor 2020.

No gráfico 7 pode-se avaliar que houve uma diminuição da resistência à compressão com adição da cinza calcinada na temperatura de 650°C, já para as cinzas calcinadas nas

temperaturas de 750°C e 850°C houve um incremento de 22% e 3% respectivamente, utilizando as médias dos resultados. Caso utilizássemos os maiores valores de cada traço, chegaríamos a uma melhora de 20% para a cinza calcinada em 750°C e 5% para a cinza calcinada em 850°C.

Gráfico 7 - Análise dos resultados do ensaio de compressão.



Fonte: Autor, (2020).

4.2 Resistência à compressão com a melhor temperatura de queima da cinza

Com as substituições de 5%, 15%, 35% e 45% do cimento por cinza calcinada na temperatura de 750°C, obteve-se os resultados da Tabela 4, que demonstra os dados de resistência de cada corpo de prova e o Gráfico 8, que mostra os valores médios obtidos de resistência à compressão.

Tabela 4 - Resistência à compressão com a cinza de 750°C.

Traço	Resistência MPa				Média	Desvio Padrão
REF	14,03	18,28	15,15	16,87	16,08	1,87
5%	20,39	25,11	24,57	29,57	24,91	3,76
15%	17,72	23,73	20,69	19,87	20,50	2,49
25%	17,47	21,89	17,25	21,59	19,55	2,53
35%	-	-	-	-	-	-
45%	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor, (2020).

Em termos de média, os melhores resultados foram com 5% de substituição de cimento por cinza, os resultados de resistência à compressão dos percentuais de 35% e 45%

não foram obtidos devido ao não endurecimento dos corpos de prova e a fragilidade dos mesmos que se partiram no momento da sua desforma, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 - Corpos de prova de 35% e 45% após desforma.



Fonte: Autor, (2020).

O Gráfico 8 apresenta os resultados médios obtidos da resistência à compressão da argamassa, onde o traço que teve maior resistência foi na mistura que contém 5% de cinza de sabugo de milho, enquanto os teores de 15% e 25% alcançaram resultados superiores ao traço referência, porém inferior ao traço com 5%.

Gráfico 8- Resultado médio da resistência à compressão com a cinza queimada a 750°C.

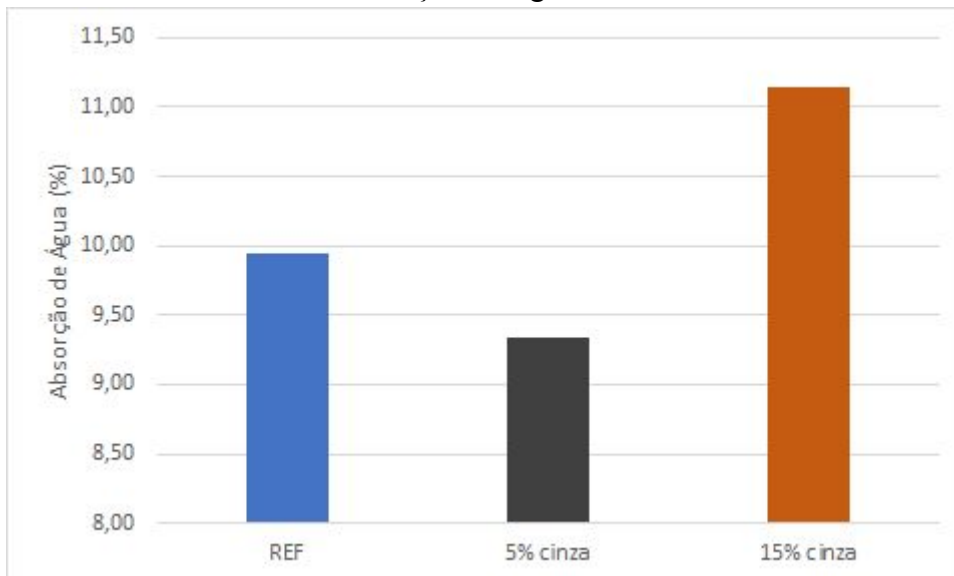


Fonte: Autor, (2020).

4.3 Índice de Absorção de Água

Os dados do ensaio de absorção de água estão apresentados no Gráfico 9. Os valores estão organizados com os resultados médios obtidos.

Gráfico 9 - Resultados de Absorção de Água.



Fonte: Autor, (2020).

No gráfico 9 podemos ver que em relação à absorção de água o traço referência absorve mais água se comparado ao traço com 5% de cinza, porém quando se incorpora um

maior percentual de cinza na mistura, se tem um aumento de absorção de água. Característica parecida que acontece com a cinza de casca de arroz, que conforme Souza (2008), absorção ocasionada pela cinza que está na mistura.

Sendo assim, neste quesito, o melhor percentual a ser incorporado na mistura é de 5% de cinza de sabugo de milho.

4.3 Índice de Consistência

O índice de consistência foi conferido em todos os traços de argamassa produzidos. O traço de referência obteve 27 cm de espalhamento, assim as misturas em que a cinza foi inserida tiveram um menor espalhamento e foram corrigidas para que se chegasse em uma diferença de ± 1 cm de espalhamento, com base no traço referência. No traço com 5% de cinza foi inserido 1,5 ml de aditivo superplastificante, os teores com 15% e 25%, foram adicionados 2,0 e 2,5 ml, respectivamente. As misturas que continham 35% e 45% de cinza, mesmo adicionando quase a quantidade máxima (2%) sobre a massa de cimento recomendado pelo fabricante de aditivo superplastificante, não foi possível realizar a correção para que se obtivesse 27 cm ± 1 cm.

Resultado decorrido devido à cinza ter uma dimensão média maior que o cimento. Espera-se que a cinza tenha uma área menor de superfície específica e demande menos água na mistura. No caso da massa específica ser menor que a do cimento, ao substituir 25% de massa do cimento por cinza, o volume de cinza adicionado é maior que o volume de cimento retirado, e isso pode causar um aumento na demanda de água na mistura. Na Figura 16 podemos ver a medição do espalhamento da argamassa e os valores obtidos sem e com a utilização do aditivo superplastificante estão descritos na Tabela 5, onde podemos ver o teor de aditivo sobre a massa de cimento de cada traço.

Figura 16 - Medição da Consistência da Argamassa.



Fonte: Autor, (2020).

Tabela 5 - Dados de consistência de argamassa com e sem aditivo superplastificante.

Traço	Consistência s/ Aditivo (cm)	Consistência c/ Aditivo (cm)	Teor de Aditivo (%)
REF	27	-	-
5%	22,6	26,2	0,25%
15%	20,2	27,8	0,28%
25%	18,5	27,4	0,53%
35%	12,3	19,2	1,60%
45%	8,1	17,6	1,98%

Fonte: Autor, (2020).

5 CONCLUSÃO

A partir da caracterização mecânica de argamassas com substituição parcial de Cimento Portland em relação a sua massa por Cinza de Sabugo de Milho na proporção de 25%, para o ensaio de materiais pozolânicos e da análise dos resultados, apresentam-se as conclusões a seguir.

Quanto ao índice de consistência, verificou-se que o aumento do teor de cinza reduz o espalhamento da argamassa, devido ao maior volume de material adicionado em função da menor massa específica.

Quanto aos ensaios de resistência à compressão para determinar o índice de pozolanicidade da cinza, houve pequena variação de resultados. A melhor temperatura para o forno mufla é na temperatura de 750°C, superando os valores das resistências dos demais traços, onde o índice de pozolanicidade ficou em 122%, vale ressaltar que o traço com a cinza calcinada na temperatura de 850°C superou o traço referência.

Para os ensaios de resistência à compressão realizados com diferentes percentuais, utilizando a mesma cinza, podemos afirmar que com 5% de substituição se obteve o melhor resultado de resistência mecânica, com a maior média de resistência à compressão. A resistência dos percentuais de 15% e 25% ficaram acima do traço referência, já os traços com 35% e 45% não são propícios para substituição devido aos corpos de prova terem se quebrado no momento da desforma. No quesito de absorção de água os valores médios ficaram

próximos a 10% de absorção, porém o traço com 5% de cinza de sabugo de milho teve o menor percentual de absorção médio.

Diante dos resultados obtidos, podemos considerar a cinza de sabugo de milho como material pozolânico, pois obteve-se um índice de pozolanicidade maior que o indicado na NBR 12653 (ABNT, 2014), que é de 90% no mínimo. Para substituir diferentes teores de cimento até os 25% de substituição se tem resultados favoráveis.

Portanto, tendo em vista que a utilização de cinza de sabugo de milho apresenta vantagens ambientais, como a destinação de um resíduo do setor agroindustrial, com a redução da produção de cimento que apresenta grande liberação de CO₂ principal causador do efeito estufa, bem como estando mantidas as características das misturas cimentícias, verificou-se a possibilidade de sua utilização para essa finalidade.

REFERÊNCIAS

- Adesanya, D.A. & Raheem, A.A. **Development of corn cob ash blended cement.** Construction and Building Materials, 2009.
- ADESANYA, D.A.; RAHEEM, A.A. **A study of the workability and compressive strength characteristics of corn cob ash blended cement concrete.** Construction And Building Materials, 2008.
- APRIANTI, E.; SHAFIGH, P.; BAHRI, S.; FARAHANI, J. N., **Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review.** Construction and Building Materials, v. 74, p. 176-187, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 3310-1**: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C618-05: **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. Philadelphia, USA, 2012.

BAUER, L. A. Falcao. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BOSE, M. L. V.; MARTINS FILHO, J. G. **O papel dos resíduos agroindustriais na alimentação de ruminantes**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.10, n.119, p.3-7, 1984.

BOYADJIAN, Brunno Lopes de Farias Escobar, J.F , Tudeschini, L.G. Sanches-Pereira, A. COELHO, S. T. **Geração de Energia com Resíduos de Biomassa no Município de Xapuri/AC**. São Paulo: Cleaner Production Towards A Sustainable Transition, 2015.

CASTRO, W. A. M. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CIMENTO MAUÁ. **Como é feito o cimento, sua composição e nomenclatura no mercado**. 2017. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/blog/cimento-como-feito-composicao-e-nomenclatura/>. Acesso em: 08 jun. 2020.

CONAB. **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA GRÃOS**. 5. ed. Brasília: Monitoramento Agrícola, 2020. (V. 7 - Safra 2019/20).

Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento. **Redução na emissão de CO2 é sinônimo de competitividade na indústria global do cimento**. 2019. Disponível em: <<https://cebds.org/reducao-de-co2-sinonimo-de-competitividade/#.XtagNTpKjIV>>. Acesso em: 02 jun. 2020.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. EMBRAPA Agroenergia: Brasília, DF. Documentos 13. 2012. 130 p.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P.

F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. EMBRAPA Agroenergia: Brasília, DF. Documentos 13. 2012. 130 p.

DUART, Marcelo Adriano. **Estudo da microestrutura do concreto com adição casca de arroz residual sem beneficiamento.** Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_arquivos/20/TDE-2008-07-15T153119Z1625/Publico/MARCELOADRIANODUART.pdf>. Acesso em 12 mai. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), **Em julho, IBGE prevê safra 5,7% menor que a de 2017.** Editoria: Estatísticas Econômicas, 2018. Disponível em:

<<http://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/22113-em-julho-ibge-preve-safra-5-7-menor-que-a-de-2017>>. Acesso em 10/06/2020.

LIMA, M. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. de A.; NASCIMENTO, J. W.B. do; LEAL, A. F. **Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação.** Revista Escola de Minas, v.61, p.285-290, 2008.

MATOS, Liana Wermelinger de. **ANÁLISE DOS MÉTODOS DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO₂ EM UMA INDÚSTRIA DE CIMENTO.** 2015. Disponível em: <http://www.inovarse.org/sites/default/files/T_15_038M_1.pdf>. Acesso em: 10 maio 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2014. 674 p.

MEHTA, P.K. **Natural Pozzolan.** In: Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987. 427p.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto**, 5 ed, Editora Bookman, São Paulo, 2015.

PEIXOTO, C. M., **O milho no Brasil, sua importância e evolução.** DuPont Pioneer, 2014. Disponível em: <<http://www.pioneersementes.com.br/mediacenter/artigos/165/o-milho-no-brasil-sua-importancia-e-evolucao>>. Acesso em 10/06/2020.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de cimento Portland.** 13^a ed.. São Paulo: Ed. Globo, 1998.

PRETO, E. V.; MORTOZA, G. L. **Geração de Energia Elétrica Utilizando Biomassa. 2010. Monografia (trabalho de conclusão do curso de Engenharia Elétrica).** Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. 2010.

PRICE, A.; YEARGIN R.; FINI E.; ABU-LEBDEH, T. **INVESTIGATING EFFECTS OF INTRODUCTION OF CORNCOB ASH INTO PORTLAND CEMENTS CONCRETE: MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES.** Greensboro: American Journal Of Engineering And Applied Sciences 7, 2014.

QUIRINO, W.F. **Utilização energética de resíduos vegetais.** Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14p.

ROMÃO, D. R., **Potencial de fibras de resíduo agrícola: palha de milho (zeamays L.) para produção de celulose.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal), Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

RURAL, Página. **Agroeste implanta novo sistema de secagem de sementes.** 2006. Disponível em: <https://www.paginarural.com.br/noticia/44524/santa-catarina-agroeste-implanta-novo-sistema-de-secagem-de-sementes>. Acesso em: 10 abr. 2020.

SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. Estudo de reações expansivas em argamassas de cimento Portland com cinza de casca de arroz (CCA). HOLOS Environment, 2007.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual.** 2013. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf. Acesso em: 02 jun. 2020.

SOUZA, Jozilene. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz.** Disponível em: < http://www.prodep.cct.ufcg.edu.br/teses/Jozilene_S_2008.pdf> Acesso em 13 de nov. 2020.

SOUZA SANTOS, P. Ciência e Tecnologia de Argilas. 2a edição revisada e ampliada, v.1, p 113; v, 2, p 468-505; Editora Edgard Blucher, 1989.

TASHIMA. Mauro Mitsuuchi. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** Dissertação (mestrado). 2006, 81 f. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira – SP. Disponível em: < https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91490/tashima_mm_me_ilha_prot.pdf?sequence=1&isAllowed=y > Acesso em: 13 mai. 2020.

TORRE, P., ALIAKBARIAN, B., RIVAS, B., DOMÍNGUEZ, J. M., CONVERTI, A. 2008. **Release of ferulic acid from corn cobs by alkaline hydrolysis.** Biochemistry Engineering Journal, v. 40, p. 500-506.

TUMBA, M.; OLATOKUNBO, O.; OSEFUNAIMHEN, U.; OLUWAFEMI, J.; OYEBISI, S. **Effect of Sulphate and Acid on Self-Compacting Concrete Containing Corn Cob Ash.** Ota: Materials Science And Engineering, 2018.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Combustíveis alternativos reduzem emissão de CO₂.** Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/estudos_casos/combustiveis-reduzem-emissao-de-co2/>. Acesso em: 02 jun. 2020.



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09